

SISTEM PENGENDALIAN POSISI SUMBU AZIMUTH PADA TURRET GUN MENGGUNAKAN FUZZY LOGIC CONTROLLER BERBASIS ARDUINO MEGA 2560

Nur Afikhah

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia
e-mail : nurafikhah@mhs.unesa.ac.id

Puput Wanarti Rusimamto

Dosen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia
e-mail : puputwanarti@unesa.ac.id

Abstrak

Pertahanan negara pada hakikatnya adalah segala upaya pertahanan yang bersifat semesta yang didasarkan pada kesadaran atas hak dan kewajiban warga negara serta keyakinan pada kekuatan sendiri dengan tujuan untuk menjaga dan melindungi kedaulatan negara, keutuhan wilayah NKRI dan keselamatan segenap bangsa. Salah satu pertahanan yang telah didukung kecanggihannya yaitu turret gun. Turret gun merupakan senjata proyektil dengan mekanisme putar dalam orientasi *azimuth* dan *elevasi* yang memungkinkan dapat di tembakkan ke berbagai arah. Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan prototipe dan mengetahui hasil pengujian sistem pengendalian posisi *azimuth* turret gun berbasis arduino mega 2560 dengan kendali Fuzzy. Skema pengendalian menggunakan *Multi Input-Single Output* (MISO) dengan dua variabel masukan adalah *error* sudut azimuth dan turunan *error*. Sedangkan keluaran kendali adalah nilai PWM. Mesin inferensi Fuzzy yang digunakan adalah metode mamdani. Hasil penelitian menunjukan bahwa sistem pengendalian posisi sumbu azimuth pada turret gun dengan menggunakan fuzzy logic controller berbasis arduino mega 2560 berhasil di buat. Plant dapat bergerak mengikuti titik koordinat yang telah diberi nilai masukan. Dengan mengimplementasikan kendali Fuzzy pada plant dapat memperbaiki respon gerak plant dengan hasil analisis respon dinamik $M_p = 2,2\%$, $E_{ss} = 0$, $t_p = 0,409$ detik, $t_s(2\%) = 1,636$ detik, $t_s(5\%) = 1,227$ detik, $t_r = 0,898$ detik, dan $t_d = 0,283$ detik.

Kata Kunci : *Azimuth, Turret Gun, Fuzzy logic Controller, Arduino Mega 2560*

Abstract

State defense is in essence all universal defense efforts based on awareness of the rights and obligations of citizens as well as beliefs on their own strength with the aim of protecting and protecting state sovereignty, the integrity of the Unitary Republic of Indonesia and the safety of all nations. One defense that has been supported by sophistication is the turret gun. Turret gun is a projectile weapon with rotary mechanism in azimuth and elevation orientation that allows it to be fired in various directions. The purpose of this research is to produce a prototype and to find out the results of testing the Arduino Mega 2560 azimuth turret gun position control system with Fuzzy control. The control scheme uses Multi Input-Single Output (MISO) with two input variables, azimuth angle error and error derivative. While the control output is the PWM value. Fuzzy inference engine used is the Mamdani method. The results showed that the azimuth axis position control system on the turret gun using the arduino mega 2560-based fuzzy logic controller was successfully made. The plant can move to follow the coordinates that have been given a value. By implementing Fuzzy control on the plant can improve plant motion response with the results of dynamic response analysis $M_p = 2,2\%$, $E_{ss} = 0$, $t_p = 0,409$ s, $t_s(2\%) = 1,636$ s, $t_s(5\%) = 1,227$ s, $t_r = 0,898$ s, dan $t_d = 0,283$ s.

Keywords : *Azimuth, Turret Gun, Fuzzy logic Controller, Arduino Mega 2560*

PENDAHULUAN

Mempertahankan wilayah NKRI harus dengan dukungan kecanggihan sarana dan prasarana. Salah satu pertahanan yang telah di dukung kecanggihannya yaitu turret gun. Turret Gun merupakan senjata proyektil dengan

mekanisme putar dalam orientasi azimuth dan elevasi yang memungkinkan dapat ditembakkan ke berbagai arah.

Dalam sistem Turret Gun dengan sumbu azimuth meliputi gerak rotasi Turret sebesar 360° terhadap

horizontalnya, sedangkan sumbu elevasi meliputi gerak rotasi laras senjata 70° terhadap vertikalnya.

Penelitian mengenai turret gun telah dilakukan oleh (Danu Wisnu, 2016). Kendali yang diimplementasikan pada Turret Gun untuk mengatur gerak horizontal atau sumbu azimuth menggunakan kendali PID. Penelitian dilakukan secara simulasi dengan model matematika Turret Gun yang telah diketahui. Dimensi Turret Gun disesuaikan dengan kebutuhan penggunaan. Semakin besar kaliber peluru maka semakin besar dimensi dan berat Turret Gun, akibatnya Turret Gun akan semakin sulit dikendalikan. Sehingga mengakibatkan pelacakan yang tidak cepat dan tepat pada saat melakukan penembakan.

Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan prototipe dan mengetahui hasil pengujian sistem pengendalian posisi azimuth Turret Gun berbasis arduino mega 2560 dengan kendali fuzzy. Skema pengendalian menggunakan *Multi Input-Single Output* (MISO) dengan dua variabel masukan adalah *error* sudut azimuth dan turunan *error*. Sedangkan keluaran kendali adalah nilai PWM. Mesin inferensi Fuzzy yang digunakan adalah metode mamdani.

KAJIAN PUSTAKA

Pemodelan Dinamik Antena Tracker

Prototipe ini di konsentrasikan pada stabilitas gerakan turret dan penolakan gangguan baik yang muncul dari dinamika struktur mekanik, friksi yang timbul dari komponen-komponen yang bergerak. Selain itu faktor vibrasi juga menjadi parameter yang perlu dipertimbangkan karena gangguan ini akan terjadi berulang ulang pada sistem dengan frekuensi dan amplitude tertentu. Hal ini yang dapat mengurangi kestabilan dan performa sistem. Gangguan-gangguan tersebut memberi efek perancangan kontroller *turret* menjadi lebih kompleks (Nasyir dkk,2018).

Dari sistem Turret Gun dapat dimodelkan berdasarkan gerak dinamis sebagai berikut

$$T_{turret} = D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (1)$$

Parameter τ adalah torsi, $D(\theta)\ddot{\theta}$ merupakan inersia sistem, $C(\theta, \dot{\theta})$ adalah vektor koriolis dan gaya sentrifugal, $G(\theta)$ merupakan gaya gravitasi yang bekerja pada sistem.

Persamaan parameter $D(\theta)$ dan $C(\theta, \dot{\theta})$ adalah sebagai berikut :

$$D(\theta) = \begin{pmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & D_{22} \end{pmatrix}, C(\theta, \dot{\theta}) = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Hubungan antara torsi yang dibutuhkan sistem gerak sumbu azimuth turret terhadap input berupa posisi sudut turret (θ_1), kecepatan putar turret ($\dot{\theta}_1$), dan percepatan

sudut turret ($\ddot{\theta}_1$), serta posisi gun (θ_2), dan kecepatan putar gun ($\dot{\theta}_2$) dapat di tunjukan persamaan dibawah ini :

$$D_{11} = \frac{1}{2}m_1R_1^2 + m_2R_1^2 + m_2R_1R_2\cos(\theta_2) + \frac{1}{3}m_1R_2^2\cos^2(\theta_2) \quad (3)$$

$$D_{22} = \frac{1}{3}m_2R_2^2 \quad (4)$$

$$C_{11} = (-m_2R_1R_2\cos(\theta_2)\dot{\theta}_2)\dot{\theta}_1 + (-\frac{1}{3}m_2R_2^2\sin(2\theta_2)\dot{\theta}_1)\dot{\theta}_2 \quad (5)$$

$$C_{11} = (\frac{1}{2}m_1R_1R_2\sin(\theta_2))\frac{1}{6}m_2R_2^2\sin(\theta_2)\dot{\theta}_1^2 \quad (6)$$

Dimana :

m_1 = Massa Turret(kg)

m_2 = Massa Gun(kg)

R_1 = Jari – jari Turret(cm)

R_2 = Jari – jari Gun(cm)

θ_1 = Sudut Azimut($^\circ$)

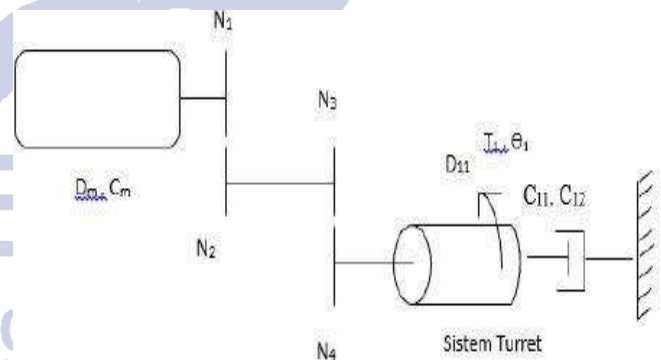
θ_2 = Sudut Elevasi($^\circ$)

Dari persamaan di atas, maka didapatkan hubungan kecepatan putar turret seperti pada persamaan

$$\dot{\theta}_1 = \frac{\tau_1 - C_{11}\dot{\theta}_1 - C_{12}\dot{\theta}_2}{D_{11}} \quad (7)$$

Persamaan (7) menjelaskan bahwa perubahan kecepatan turret berbanding lurus dengan torsi yang dialami dikurangi dengan efek gaya koriolis, dan sentripetal yang dibagi dengan inersia turret.

Sistem turret terhubung dengan servomotor DC melalui transmisi yang berfungsi untuk mereduksi putaran yang keluar dari motor. Ilustri rangkaian motor, transmisi dan turret ditunjukkan pada gambar 1 berikut.



Gambar 1. Ilustrasi Rangkaian motor, transmisi dan sistem turret

(Sumber : Danu Wisnu dkk ,2016)

Torsi yang akan masuk ke dalam sistem merupakan torsi keluaran motor yang telah dipengaruhi oleh transmisi roda gigi. Sementara itu hubungan antara torsi motor dan penggerak (T motor), transmisi (N) dan torsi dari sistem turret (T turret) ditunjukkan pada persamaan 8. dimana N didapatkan dari rasio gigi dari keseluruhan pada transmisi penggerak.

$$N = N_1 \times N_2 \quad (8)$$

$$T_{motor} = K_t I_a(t) \quad (9)$$

$$T_{sistem} = T_{motor} \times N \quad (10)$$

Kemudian persamaan besar torsi yang dibutuhkan sistem adalah sebagai berikut :

$$T_{motor} = D_{11}\ddot{\theta}_1 + C_{11}\dot{\theta}_1 + C_{11}\theta_1 \quad (11)$$

Dimana:

T_{sistem} = Torsi sistem azimuth

D_{11} = Inersia sistem turret

C_{11} = Konstanta damping sistem

C_{12} = Efek koriolis gun terhadap turret

$\dot{\theta}_1$ = Perubahan kecepatan sistem azimuth

$\dot{\theta}_2$ = Perubahan kecepatan sistem elevasi

$\ddot{\theta}_1$ = Perubahan percepatan sistem azimuth

Selanjutnya hubungan antara armature current, $i_a(t)$, armature voltage, $e_a(t)$, dan back electromotive force, $v_b(t)$, pada motor DC seperti persamaan 10 (Danu wisnu dkk, 2016)

$$E_a(t) = R_a I_a(t) + L_a \dot{I}_a(t) + V_b(t) \quad (12)$$

Dimana back electromotive force dirumuskan sebagai:

$$V_b(t) = K_b \dot{\theta}_1(t) \quad (13)$$

Karena torsi yang dihasilkan oleh motor adalah sebanding dengan arus, maka diperoleh persamaan 14

$$T_m(t) = K_t I_a(t) \quad (14)$$

$$I_a(t) = \frac{1}{K_t} T_m(t) \quad (15)$$

Transfer fuction motor diperoleh dari persamaan (11) dan (13) yang kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan (10), sehingga didapatkan persamaan seperti berikut:

$$E_a(t) = \frac{(R_a L_a) T_m(t)}{K_t} K_b \dot{\theta}_1(t) \quad (16)$$

Untuk torsi yang dihasilkan motor penggerak $T_m(t)$ dengan tegangan listrik yang diberikan (E_a) dapat ditunjukkan pada persamaan 17 (Nise,2011).

$$T_m(t) = \frac{K_t(E_a(t) - K_b \dot{\theta}_1(t))}{R_a} \quad (17)$$

Dari persamaan 17 diatas dijelaskan hubungan antara parameter konstanta torsi motor (K_t), back EMF (K_b) dan resistansi motor (R_a) dalam waktu tertentu.

Persamaan 11 dan 17 dimasukkan kedalam persamaan 10, menghasilkan hubungan antara tegangan listrik yang diberikan pada motor terhadap torsi yang diterima oleh sistem seperti persamaan 18.

$$D_{11}\ddot{\theta}_1 + C_{11}\dot{\theta}_1 + C_{11}\theta_1 = \frac{K_t(E_a(t) - K_b \dot{\theta}_1(t))}{R_a} \times N \quad (18)$$

$$E_a = \frac{R_a(D_{11}\ddot{\theta}_1 + C_{11}\dot{\theta}_1 + C_{11}\theta_1) + \dot{N}K_tK_b}{NK_t} \quad (19)$$

Pada persamaan (17) sistem masih dalam kondisi nonlinear. Agar dapat dilinearisasi maka diubah kedalam bentuk $\dot{\theta}_1$.

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_1 &= \frac{K_t E_a N - (NK_t K_b + R_a C_{11})\dot{\theta}_1 - R_a C_{12}\dot{\theta}_2}{R_a D_{11}} \\ &= \frac{K_t E_a N - [(R_a m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2)) + R_a \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \sin(2\theta_2)]\dot{\theta}_2 - NK_t K_b \dot{\theta}_1}{R_a (\frac{1}{3} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2))} \end{aligned} \quad (20)$$

Persamaan (19) merupakan persamaan bentuk non-linear. Persamaan ini harus dilinearisasi dengan metode linearisasi yang digunakan adalah metode *jacobian*. (Danu Wisnu,2016).

Misal:

$$\begin{aligned} x_1 &= \theta_1 \\ x_1 &= \dot{x}_1 = \dot{\theta}_1 \\ \dot{x}_1 &= x_2 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{K_t E_a N - [(R_a m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2)) + R_a \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \sin(2\theta_2)]\dot{\theta}_2 - NK_t K_b \dot{\theta}_1}{R_a (\frac{1}{3} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2))} x_2 \quad (22)$$

Persamaan (19) dan (20) merupakan persamaan diferensial non-linear yang akan diubah menjadi persamaan linear dengan menggunakan metode Jacobian pada sekitar titik kesetimbangannya. Titik setimbang merupakan pendekatan pada saat kondisi sistem sudah titik berubah lagi, yang di rumuskan sebagai :

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2) &= x_2 = 0 \\ &= \frac{K_t E_a N - [(R_a m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2)) + R_a \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \sin(2\theta_2)]\dot{\theta}_2 - NK_t K_b \dot{\theta}_1}{R_a (\frac{1}{3} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2))} \dot{\theta}_1 \\ &= 0 \end{aligned}$$

Dimana:

x_1 = posisi turret

x_2 = Kecepatan turret

Posisi turret akan setimbang karena $x_2 = 0$ atau pada saat posisi turret diam. Untuk persamaan (21) adalah bentuk matriks Jacobian dimana diperoleh bentuk linearisasi titik kesetimbangan seperti pada persamaan (24).

$$j(\bar{x}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{NK_t K_b} \\ 0 & \frac{K_t E_a N}{R_a (\frac{1}{3} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2))} \end{pmatrix} \quad (24)$$

Persamaan (24) merupakan matriks A untuk model statespace $\dot{x}_1 = Ax + Bu$ dan $y = Cx + Du$. Untuk menentukan matriks B, C dan D sama seperti langkah sebelumnya sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$B = \begin{pmatrix} \frac{1}{K_t E_a N} \\ \frac{K_t E_a N}{R_a (\frac{1}{3} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2))} \end{pmatrix} \quad (25)$$

$$C = (1 \ 0)$$

$$D = (0)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{N K_t K_b} \\ 0 & R_a \frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{K_t E_a N} \\ R_a \frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2) \end{pmatrix} E_a(t)$$

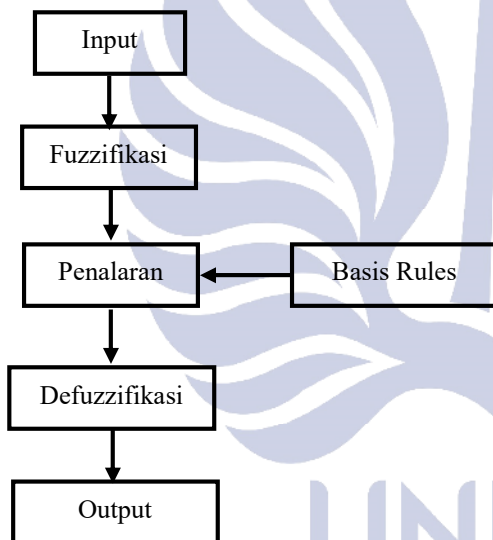
$$[y] = [1 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Fuzzy Logic Controller

Sistem *Fuzzy Logic Controller* disebut juga sistem Inferensi *Fuzzy* (*Fuzzy Inference System/FIS*) atau *fuzzy inference engine* adalah sistem yang dapat melakukan penalaran dengan prinsip serupa seperti manusia melakukan penalaran dengan nalurinya.

Terdapat beberapa jenis FIS yang dikenal yaitu Mamdani, Sugeno dan Tsukamoto. FIS yang paling mudah dimengerti, karena paling sesuai dengan naluri manusia adalah FIS Mamdani. FIS tersebut bekerja berdasarkan kaidah-kaidah lingistik dan memiliki algoritma *fuzzy* yang menyediakan sebuah aproksimasi untuk dimasuki analisa matematik (Sumber: Jannus Maurits Nainggolan, 2009).

Sistem kendali logika *fuzzy* terdiri dari beberapa tahapan seperti pada diagram berikut.



Gambar 2 Proses *Fuzzy Logic Controller*
(Sumber : Jannus Maurits Nainggolan, 2009)

Proses dalam *fuzzy logic controller* ditunjukkan pada Gambar 2 diatas. Input yang diberikan adalah berupa bilangan tertentu dan output yang dihasilkan juga harus berupa bilangan tertentu. Aturan-aturan dalam bahasa linguistik dapat digunakan sebagai input yang bersifat teliti harus dikonversikan terlebih dahulu, lalu melakukan penalaran berdasarkan aturan-aturan dan mengkonversi hasil penalaran tersebut menjadi output yang bersifat teliti (Jannus Maurits Nainggolan, 2009).

METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

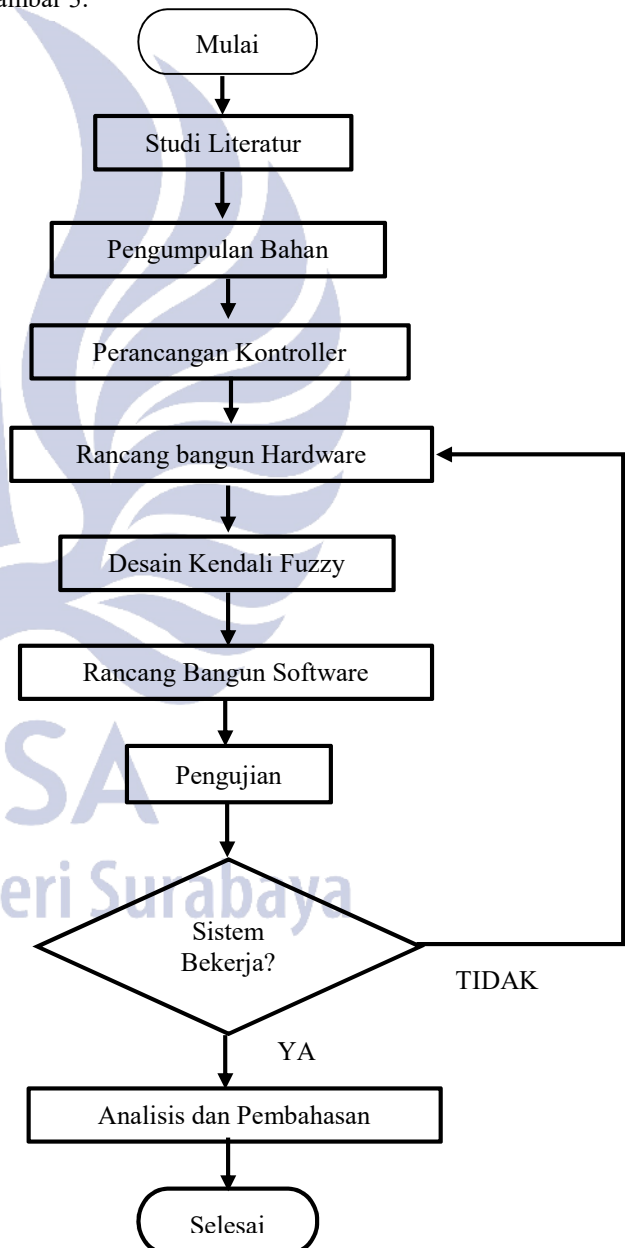
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif. Pendekatan kuantitatif adalah salah satu upaya pencarian ilmiah yang didasari oleh filsafat positivisme logikal yang

beroperasi dengan aturan-aturan yang ketat mengenai logika, kebenaran, hukum-hukum, dan prediksi. Fokus penelitian kuantitatif diidentifikasi sebagai proses kerja yang berlangsung secara ringkas, terbatas, dan memilah-memilih permasalahan menjadi bagian yang dapat diukur atau dinyatakan dalam angka-angka (Surya, 2008).

Pada penelitian ini mikrokontroler yang digunakan ialah Arduino Mega 2560 sebagai *software* pemrogramannya. Matlab 2016b digunakan untuk menjalankan simulasi kendali *fuzzy* yang akan diterapkan pada *plant*. Dan membuat rancang bangun *plant* yang akan menghasilkan respon posisi sudut *azimuth* pada *turret gun*.

Rancangan Penelitian

Urutan rancangan penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.

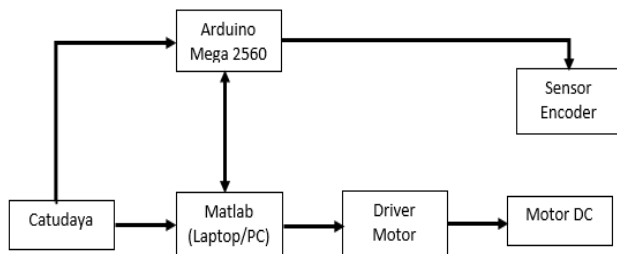


Gambar 3. Tahapan rancangan penelitian

Rancang Bangun Hardware

1. Desain Sistem

Desain sistem pengendalian posisi azimuth Turret Gun berbasis arduino mega menggunakan kendali Fuzzy ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Model desain sistem pengendalian posisi azimuth turret gun menggunakan kendali fuzzy berbasis arduino mega

Pada blok perangkat kerasnya terdiri dari catu daya DC, Arduino Mega, Driver Motor, Motor DC, dan Encoder. Terdapat MATLAB sebagai pengolahan data.

2. Rancangan Plant Turret Gun

Plant Turret Gun terdiri dari box kendali dengan panjang 30cm, lebar 25cm dan tinggi 11cm. Dimana pada box terdapat saklar on off dan tombol reset. Diatas box kendali terdapat sebuah sumbu azimuth yang akan digerakkan oleh motor DC. Desain plant Turret Gun seperti pada Gambar 5.

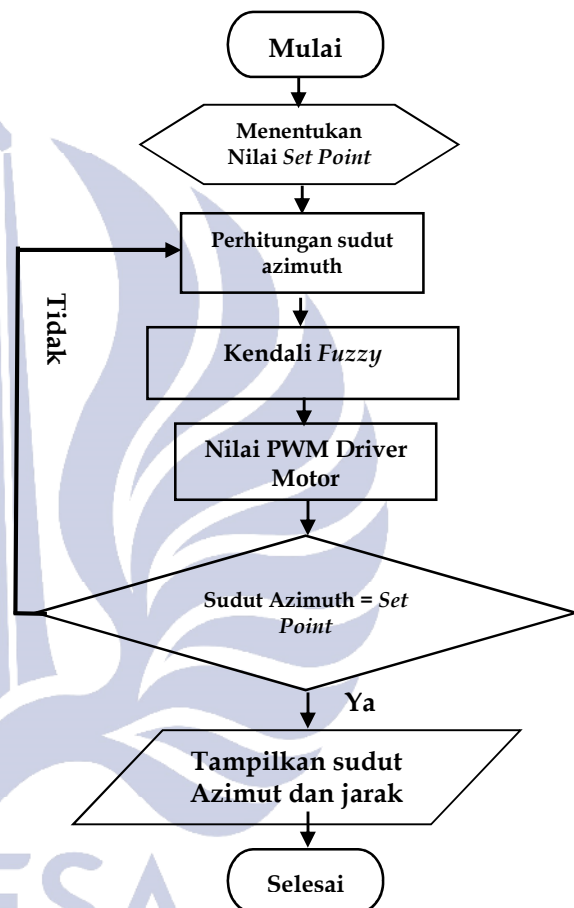


Gambar 5. Desain Turret Gun

Rancang Bangun Software

Rancang bangun *software* yang dimaksud ialah sebuah program yang dimasukkan ke dalam mikrokontroller Arduino. Bahasa pemrograman yang digunakan adalah bahasa C++ yang dapat digunakan untuk perhitungan matematis yang dibutuhkan untuk menghitung sudut azimuth dan algoritma controller *Fuzzy*. Karena arduino IDE bersifat *opensource*, maka banyak *library* yang dikembangkan oleh perorangan atau komunitas diluar *developer* Arduino itu sendiri.

Secara garis besar program berjalan dengan membaca posisi sudut *azimuth* (*set point*), kemudian menentukan pergerakan motor DC. Algoritma controller *Fuzzy* yang terdapat dalam mikrokontroller akan menghasilkan sinyal PWM bagi *driver* motor DC. Jika sudut yang dihasilkan tidak sesuai dengan pembacaan sudut encoder, maka nilai tersebut akan menjadi sinyal yang akan kembali diproses perhitungan sudut *azimuth* dan menjadi acuan dari pengendadali *Fuzzy* hingga nilai *error*nya mendekati 0. Jalannya program ditunjukkan melalui diagram alir pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram alir rancangan *software*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dan analisis meliputi ; 1) Tampilan Perangkat Keras *Turret Gun*, 2) pengujian dan analisis plant tanpa kendali, 3) pengujian dan analisis plant dengan kendali *Fuzzy*.

Tampilan perangkat Keras Turret Gun

1. Tampak depan

**Gambar 7.** Diagram alir rancangan *software*

2. Tampak belakang

**Gambar 8.** Diagram alir rancangan *software*

3. Tampak samping

**Gambar 9.** Diagram alir rancangan *software***Pengujian dan Analisis Plant Tanpa Kendali****1. Pemodelan Dinamik Plant**

Identifikasi *plant* digunakan untuk mencari fungsi alih sehingga dapat diketahui respon dari *plant* tanpa menjalankan alatnya. Identifikasi *plant* menggunakan pemodelan dinamik dengan mencari nilai dari parameter fisik *plant*. Parameter fisik diketahui berdasarkan *datasheet* motor DC yang

digunakan dan pengukuran komponen lain. Didapatkan parameter fisik yang ditunjukkan Tabel 1.

Tabel 1. Parameter fisik *plant*

Parameter	Simbol	Nilai
Resistansi motor (Ω)	R_a	1,9
Rasio gigi (rpm)	N	1 : 2,5
Torsi motor (Nm/A)	K_t	0,0134
Tegangan Konstan (V/Krpm)	K_b	2,117
Massa turret (Kg)	M_1	0,025
Massa gun (Kg)	M_2	0,01
Jari-jari turret (m)	R_1	0,06
Jari-jari gun (m)	R_2	0,22
Tegangan Motor (V)	E_a	12

Berdasarkan Tabel 1, dapat dicari fungsi alih dari turret gun dengan memasukkan nilai yang telah di dapat kedalam variabel A,B,C dan D agar lebih mudah untuk memasukkan rumus ke Matlab.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{N K_t K_b} \\ \frac{1}{R_a} \frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2) & \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{1}{K_t E_a N} \\ \frac{1}{R_a} \frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2) \end{pmatrix}$$

$$C = (1 \ 0)$$

$$D = (0)$$

Variabel sate A,B,C, dan D dirubah menjadi state space model dengan fungsi Mathscript yaitu :

$$\text{StateSpace} = \text{ss} (A,B,C,D)$$

Keluaran state space model turret gun yaitu :

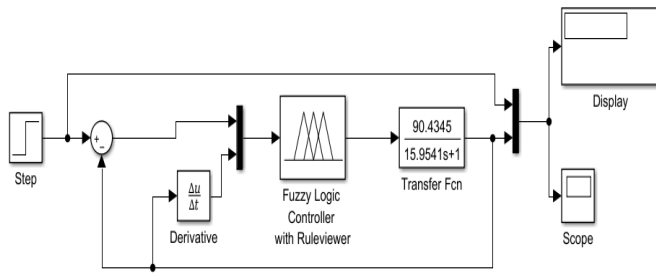
$$\frac{dx}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -15,9541 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 90,4345 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = [1 \ 0]x(t) + [0]u(t)$$

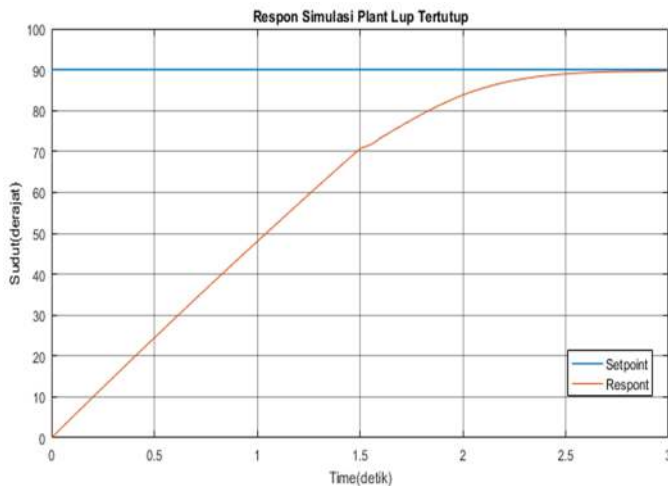
Variabel TF adalah model transfer function sistem turret gun, yaitu :

$$TF = \frac{90,4345}{15,9541s+1} \quad (27)$$

Dari Persamaan 27, telah didapatkan fungsi alih *plant*. Pemodelan fisik disimulasikan secara lup tertutup menggunakan *software* SIMULINK/ MATLAB untuk melihat respon fungsi alih. Nilai masukan yang diberikan sebesar 90 derajat. Diagram blok sistem lup tertutup ditunjukkan Gambar 10 dan hasil respon simulasi *plant* lup tertutup ditunjukkan Gambar 11. Simulasi tidak dilakukan dengan cara lup terbuka dikarenakan tidak adanya feedback pada sistem sehingga menghasilkan nilai yang tidak stabil.



Gambar 10. Diagram blok fungsi alih *plant* lup tertutup

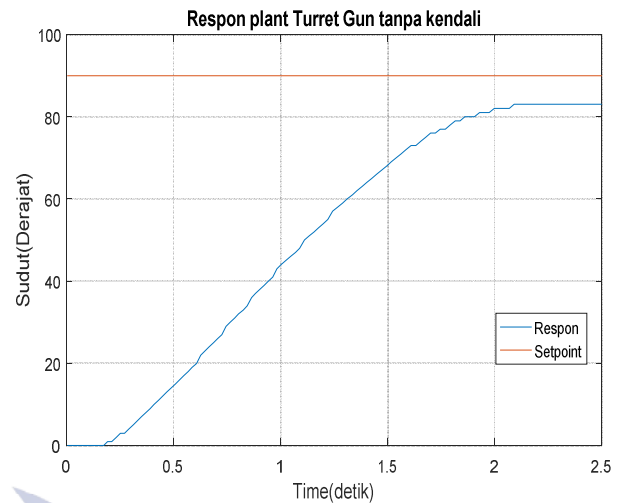


Gambar 11. Respon simulasi *plant* lup tertutup

2. Plant Nyata Tanpa Kendali

Pengujian *plant* nyata tanpa kendali dilakukan untuk melihat respon *plant* turret gun untuk mencapai nilai masukan yang diinginkan. Catu daya untuk motor menggunakan tegangan 12 V. Nilai masukan yang diberikan sebesar 90 derajat. Pengujian dilakukan secara lup tertutup. Hasil respon dinamik dan selisih *error* ditunjukkan Tabel 2.

Berdasarkan Tabel 2. diketahui bahwa *plant* nyata tanpa kendali tidak dapat mengikuti nilai masukan yang diinginkan dan memiliki nilai E_{ss} sebesar 7 derajat. Sedangkan *plant* simulasi tanpa kendali dapat mengikuti nilai masukan. Hasil pemodelan fisik dapat mendekati *plant* nyata. Perbedaan hasil simulasi dan *plant* nyata dapat disebabkan nilai parameter fisik yang tidak diketahui dan diabaikan. Rumus yang dikemukakan sebelumnya juga tidak sepenuhnya sesuai dengan bentuk *plant* saat ini karena bentuknya yang berbeda.



Gambar 12. Respon *plant* nyata tanpa kendali

Tabel 2. Respon dinamik dan selisih *error* antara sistem nyata dan simulasi

Parameter	Plant nyata	Simulasi	satuan
M_p (simpangan maksimum)	-	-	%
E_{ss} (<i>error steady state</i>)	7	0	derajat
t_p (waktu simpangan maksimum)	-	-	detik
t_s (waktu tunak) 2 %	2,648	4,8	detik
t_s (waktu tunak) 5 %	1,986	3,6	detik
t_r (waktu naik)	1,454	2,636	detik
t_d (waktu tunda)	0,458	0,831	detik

Pengujian dan Analisis *Plant* dengan Kendali Fuzzy

Mendesain kendali Fuzzy tidak diperlukan model matematika dari *plant*. Semesta pembicaraan dari nilai masukan dan keluaran serta karakteristik *plant* sangat penting untuk diketahui. Semesta pembicaraan untuk variabel masukan Fuzzy *error* dan delta *error* merupakan besar *error* sudut dari sudut awal ke sudut masukan yang diberikan. Sehingga rentang nilai semesta pembicaraan nilai masukan dimulai dari -90° hingga 90°. Pada penelitian ini himpunan Fuzzy pada setiap variabel masukan *error* dan delta *error* dibatasi hanya 5 yaitu NB (*Negative Big*), NS (*Negatif Small*), Z (*Zero*), PS (*Positive Small*), PB (*Positive Big*). Dengan bentuk fungsi keanggotaan kurva segitiga dan trapesium.

Semesta pembicaraan untuk variabel keluaran Fuzzy merupakan nilai PWM yang dapat dikeluarkan oleh Arduino yaitu 0 hingga 180. sehingga nilai semesta pembicaraan nilai keluaran dimulai dari -8,9 hingga 10,2. Pada penelitian ini himpunan Fuzzy untuk variabel keluaran dan bentuk fungsi keanggotaan sama dengan variabel masukan.

Basis aturan dasar yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan aturan *IF-THEN* dengan metode

implikasi “MIN” dan jumlah aturan yang dihasilkan sesuai dengan jumlah himpunan Fuzzy yang digunakan pada setiap variabel. Kemudian hasil dari setiap aturan Fuzzy diagregasikan menggunakan metode “MAX”. Basis aturan Fuzzy yang direncanakan ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Basis aturan PD Fuzzy dasar.

$\begin{matrix} e \\ de \end{matrix}$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	Z
NS	NB	NB	NS	Z	Z
Z	NB	NS	Z	PS	PB
PS	Z	Z	PS	PB	PB
PB	Z	PS	PB	PB	PB

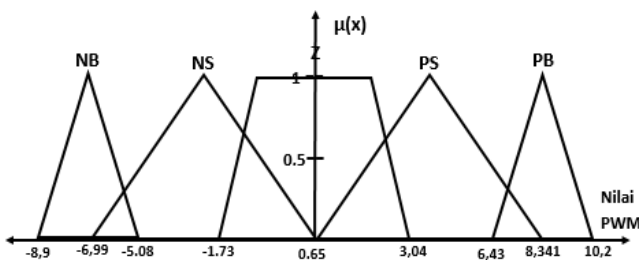
Metode defuzzifikasi yang digunakan ialah *center of gravity*, yaitu menghitung nilai keluaran sama seperti menghitung pusat area dari suatu kurva tertutup yang seperti persamaan (28). Semesta pembicaraan untuk nilai keluaran Fuzzy dilebihi karena dengan metode defuzzifikasi *center of gravity*, nilai keluaran tidak akan kurang dari -180 dan tidak lebih 180. bentuk fungsi keanggotaan keluaran ditunjukkan Gambar 16.

$$COG = \frac{\int_a^b \mu_A(x) x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx} \quad (28)$$

Keterangan :

- a = batas bawah nilai himpunan Fuzzy
- b = batas atas nilai himpunan Fuzzy
- $\mu_A(x)$ = nilai derajat keanggotaan Fuzzy
- x = nilai himpunan Fuzzy

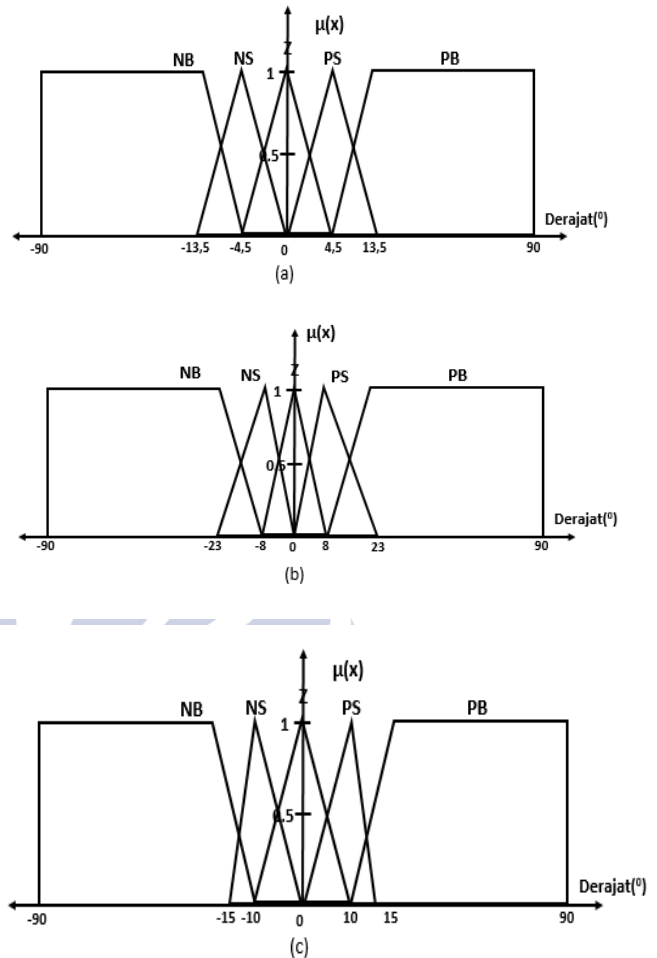
Pada pengujian ini, bentuk fungsi keanggotaan pada setiap variabel masukan *error* dan *delta error* dirancang menjadi tiga model berbeda dengan basis aturan yang sama dan bentuk fungsi keanggotaan keluaran yang sama.



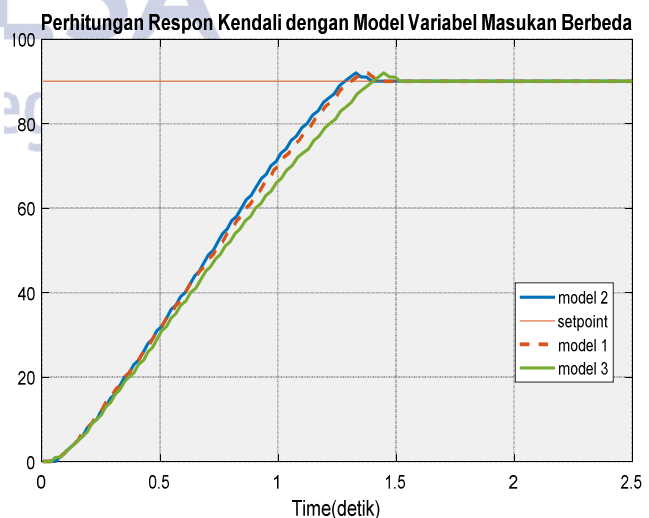
Gambar 13. Bentuk dasar fungsi keanggotaan variabel keluaran

Bentuk dari tiga model fungsi keanggotaan variabel masukan *error* dan *delta error* ditunjukkan pada Gambar 14. Untuk basis aturan Fuzzy dasar yang digunakan seperti Tabel 3. Nilai masukan yang diberikan sebesar 90 derajat.

Grafik respon dinamik dari pengujian ditunjukkan Gambar 15 sedangkan analisis respon dinamik ditunjukkan Tabel 4.



Gambar 14. 3 model fungsi keanggotaan variabel masukan *error* dan *delta error* (a) model 1 (b) model 2 (c) model 3



Gambar 15. Perbandingan respon *plant* dengan berbagai model variabel masukan

Tabel 4. Respon dinamik *plant*

Parameter	Model 1	Model 2	Model 3	Satuan
M_p (Simpangan Maksimum)	2,2	2,2	2,2	%
E_{ss} (Error Steady State)	0	0	0	derajat
t_p (waktu M_p)	0,43	0,409	0,488	detik
t_s (waktu tunak) 2%	1,72	1,636	1,952	detik
t_s (waktu tunak) 5%	1,29	1,227	1,464	detik
t_r (waktu naik)	0,944	0,898	1,072	detik
t_d (waktu tunda)	0,298	0,283	0,338	detik

Berdasarkan hasil analisis respon dinamik pengujian dapat diketahui semua model mengikuti nilai masukan dan memiliki nilai simpangan maksimum 2,2%. Model pertama memiliki respon dinamik yang sedikit cepat dari model kedua. Model ketiga memiliki respon dinamik paling lama dan memiliki osilasi lebih banyak dari semua model. Model kedua memiliki respon yang sedikit lebih cepat dari model semua model. Model kedua merupakan model terbaik dibanding model yang lain karena memiliki keseluruhan respon dinamik yang cepat, osilasi yang sedikit, dan dapat mengikuti nilai masukan. Respon dinamik perbandingan antara *plant* dengan kendali Fuzzy dan tanpa kendali ditunjukkan Tabel 5.

Tabel 5. Respon dinamik *plant* dengan kendali PD Fuzzy dan tanpa kendali

Parameter	PD Fuzzy	Tanpa Kendali	Satuan
M_p (Simpangan Maksimum)	2,2	-	%
E_{ss} (Error Steady State)	0	7	derajat
t_p (waktu M_p)	0,409	-	detik
t_s (waktu tunak) 2%	1,636	2,648	detik
t_s (waktu tunak) 5%	1,227	1,986	detik
t_r (waktu naik)	0,898	1,454	detik
t_d (waktu tunda)	0,283	0,458	detik

PENUTUP

Simpulan

Prototipe antenna *tracker* dengan pengendali Fuzzy berhasil dibuat dan bekerja dengan baik. Pengendali diimplementasikan menggunakan Matlab/Simulink, dan prosedur pelaksanaan kontroler logika fuzzy dalam Matlab/Simulink menggunakan logika fuzzy toolbox untuk menjalankan kontrol dari sistem turret gun.

Dari hasil Implementasi kendali Fuzzy pada *plant*. Desain kendali Fuzzy yang terbaik mengacu pada Tabel 5 menghasilkan respon dinamik $M_p = 2,2\%$, $E_{ss} = 0$, $t_p = 0,409$ detik, t_s (2%) = 1,636 detik, t_s (5%) = 1,227 detik, $t_r = 0,898$ detik, dan $t_d = 0,283$ detik.

Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, ada beberapa saran untuk pengembangan sistem pengendalian posisi azimuth turret gun. *Plant* juga dapat ditambah pengendalian posisi elevasi. Untuk menggunakan kendali Fuzzy, peneliti menyarankan untuk menggunakan mikrokontroler yang memiliki spesifikasi *clock* yang lebih tinggi dari Arduino MEGA 2560 karena untuk mengimplementasikan algoritma Fuzzy membutuhkan banyak perhitungan sehingga proses eksekusi program lebih lama.

DAFTAR PUSTAKA

- Kunto, Dimas., Wahjudi, Arif., Nurhadi, Hendro. 2016. "Perancangan Sistem Kontrol PID Untuk Pengendalian Sumbu Elevasi Gun Pada Turret-Gun Kaliber 20mm". Jurnal Teknik ITS Vol.5, No.2. 2016.
- Machali, Imam. 2016. "Metode Penelitian Kuantitatif". Yogyakarta : MPI Fakultas Ilmu Tarbiyah dan Keguruan UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
- Nainggolan, Jannus Maurits. 2009 "Logika Fuzzy (Fuzzy Logic) : Teori dan Penerapan Pada Sistem Daya" (online), (http://member.unila.ac.id/~ftelektro/lab/ltp_e/dokumen/Fuzzy%20Logic%20Paper.doc, diakses pada 20 desember 2018).
- Nise, Norman S. 2011. "Control System Engineering. Sixth Edition". USA: John Wiley & Sons, Inc
- Reznik, Leonid. 1997. "Fuzzy Controller". Oxford : Newnes
- Surya, 2008. "Pendekatan, Jenis, dan Metode Penelitian Pendidikan" (online), (<http://staff.uny.ac.id/sites/default/files/PENELITIAN%20PENDIDIKAN.pdf> di akses pada 20 desember 2018)
- Tim Penyusun Buku Pedoman Penulisan Skripsi. 2014. "Pedoman Penulisan SKRIPSI". Surabaya : Universitas Negeri Surabaya
- Wisnu, Danu., Wahyudi, Arif., Nurhadi, Hendro. 2016. "Perancangan Sistem Kontrol PID Untuk Pengendali Sumbu Azimuth Turret Pada Turret-Gun Kaliber 20mm". Jurnal teknik ITS vol.5, no 2. 2016.